

INFORME PROYECTOS— 2024

Investigación sobre sistemas de transmisión inalámbricos de datos de bajo consumo. 'NODES'

Informe final

Número de proyecto: 22400004

Expediente: IMAMCA/2024/2

Duración: Del 01/01/2024 al 31/12/2024

Coordinado en AIDIMME por: Sergio López Cataluña

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO



GENERALITAT
VALENCIANA

iVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETENCIAS EMPLEADORAS

AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

TABLA DE CUADROS	1
TABLA DE ILUSTRACIONES	1
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. INTRODUCCIÓN	6
2.2. TECNOLOGÍAS DE TRANSMISIÓN PARA IOT DE BAJO CONSUMO	6
2.2.1. LORA (LONG RANGE)	6
2.2.2. WIFI (IEEE 802.11).....	7
2.2.3. BLE (BLUETOOTH LOW ENERGY).....	7
2.2.4. BANDA 868 MHZ.....	7
2.3. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS	7
2.4. CONCLUSIÓN	8
2.5. IMPACTO EN LA INDUSTRIA Y LA SOCIEDAD	8
2.5.1. IMPACTO EN LA INDUSTRIA.....	9
2.5.2. IMPACTO EN LA SOCIEDAD.....	9
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	10
3.1 ESPECIFICACIONES DE LOS NODOS Y DEL GATEWAY.	10
3.1.1 NODO	10
3.1.2 GATEWAY	13
3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO	14
3.3 DISEÑO DE LA PCB.....	23

3.4	FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS	26
4.	<u>PRUEBAS EN ENTORNO INDUSTRIAL</u>	<u>31</u>
4.1.	CONFIGURACIÓN DE LAS PRUEBAS	31
4.2.	SIMULACIÓN DEL ENTORNO INDUSTRIAL.....	31
4.3.	RESULTADOS Y AJUSTES	31
4.4.	CONCLUSIÓN DE LAS PRUEBAS	32
5.	<u>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</u>	<u>33</u>

TABLA DE CUADROS

Tabla 1 Comparativa de Tecnologías.....	8
Tabla 2 Bill of Materials	26

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Nodo low power	5
Ilustración 2 LoRa	6
Ilustración 3 Red mallada	11
Ilustración 4 MCU	14
Ilustración 5 MAX 471	15
Ilustración 6 Esquema Digital IN.....	16
Ilustración 7 Circuito de alimentación.....	18
Ilustración 8 Circuito de salidas digitales	20
Ilustración 9 Módulo analógico	21
Ilustración 10 Layout	23
Ilustración 11 TOP 3D	24
Ilustración 12 PCB BOTTOM 3D.....	25
Ilustración 13 GERBER	27
Ilustración 14 Drill files.	28
Ilustración 15 Visor GERBER	29
Ilustración 16 TOP del prototipo	30

Ilustración 17 Bottom del prototipo.....	30
--	----

Acrónimos y abreviaturas

- IA - Inteligencia Artificial
- MES - Manufacturing Execution System (Sistema de Ejecución de Manufactura)
- PLCs - Controladores Lógicos Programables
- SCADA - Supervisión, Control y Adquisición de Datos (Supervisory Control and Data Acquisition)
- IoT - Internet de las Cosas (Internet of Things)
- CPS - Sistemas Ciberfísicos
- ERP - Enterprise Resource Planning (Planificación de Recursos Empresariales)
- API - Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)
- OEE - Overall Equipment Effectiveness (Efectividad General de los Equipos)
- ISM - (Industrial, Scientific and Medical)
- PCB – (Printed Circuit Board)
- EDA – (Electronic Design Automation)

1. Introducción

En el contexto actual de la tecnología, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha emergido como una de las áreas de mayor crecimiento e impacto en diversos sectores, desde la industria hasta el hogar inteligente. La capacidad de conectar dispositivos y sistemas para recopilar, transmitir y analizar datos en tiempo real ha revolucionado la forma en que interactuamos con el entorno. Sin embargo, este avance tecnológico conlleva desafíos significativos, especialmente en lo que respecta al consumo energético y la eficiencia de los nodos de captura y transmisión de datos.

En 2024, el panorama tecnológico del IoT ha estado marcado por una creciente demanda de soluciones que equilibren el rendimiento con la sostenibilidad energética. Los nodos IoT, que son los encargados de capturar y transmitir información, suelen operar en entornos donde el acceso a fuentes de energía continua es limitado o inexistente. Esto ha impulsado la investigación y el desarrollo de sistemas y componentes que permitan reducir el consumo energético sin comprometer la funcionalidad y la fiabilidad de las comunicaciones.

Una de las tendencias más destacadas en este ámbito es el uso de protocolos de radiofrecuencia de baja potencia (LP, Low Power), como LoRaWAN, Zigbee, y NB-IoT, que permiten la transmisión de datos a largas distancias con un consumo mínimo de energía. Estos protocolos son especialmente adecuados para aplicaciones donde los dispositivos deben operar durante años con una sola batería, como en la monitorización de condiciones ambientales, la agricultura inteligente, o la gestión de infraestructuras críticas.



Ilustración 1 Nodo low power

Además, el diseño de electrónica de acondicionamiento de señales que integre componentes pasivos y consuma del orden de microamperios es fundamental para garantizar que los nodos IoT sean verdaderamente eficientes. Estos sistemas deben ser capaces de manejar señales industriales, tanto de entrada como de salida, sin incrementar significativamente el consumo energético, lo que requiere un enfoque innovador en el diseño de circuitos y la selección de componentes.

En este proyecto, nos enfocamos en abordar estos desafíos mediante la investigación y desarrollo de un nodo IoT de bajo consumo que integre tecnologías de radiofrecuencia LP y una electrónica de acondicionamiento de señales optimizada. El objetivo es contribuir al avance de soluciones IoT sostenibles y eficientes, que no solo cumplan con los requisitos técnicos actuales, sino que también estén alineadas con las demandas futuras de un mundo cada vez más conectado y consciente de la importancia de la eficiencia energética.

A través de este trabajo, a través del proyecto NODES buscamos no solo reducir el consumo energético de los nodos IoT, sino también demostrar que es posible desarrollar sistemas que sean tanto tecnológicamente avanzados como ambientalmente responsables, sentando las bases para futuras innovaciones en este campo.

2. Estado del arte

2.1. Introducción

El Internet de las Cosas (IoT) ha evolucionado significativamente en la última década, impulsando el desarrollo de dispositivos conectados con requerimientos específicos de eficiencia energética y transmisión de datos. En la actualidad, diversas tecnologías de comunicación permiten la conectividad de sensores y nodos de captura de datos en aplicaciones industriales, agrícolas y urbanas. Este documento analiza el estado del arte de las tecnologías de transmisión de datos más utilizadas en IoT de bajo consumo, incluyendo LoRa, WiFi, BLE y la banda de 868 MHz.

2.2. Tecnologías de Transmisión para IoT de Bajo Consumo

2.2.1. LoRa (Long Range)

LoRa es una tecnología de modulación de espectro ensanchado desarrollada por Semtech, diseñada para proporcionar comunicación de largo alcance con un consumo energético extremadamente bajo. Utiliza la banda de frecuencias ISM (Industrial, Scientific and Medical), con variantes en 433 MHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EE.UU.).

Las principales ventajas de LoRa incluyen su gran alcance, que puede alcanzar hasta 15 km en entornos rurales y 5 km en urbanos, y su bajo consumo energético, lo que la hace ideal para dispositivos alimentados por batería. Además, LoRa puede operar en redes tanto públicas como privadas. Sin embargo, presenta desventajas como una baja tasa de transferencia de datos, que oscila entre 0.3 kbps y 50 kbps, y una latencia relativamente alta, lo que la hace inadecuada para aplicaciones en tiempo real.



Ilustración 2 LoRa

2.2.2. WiFi (IEEE 802.11)

WiFi es una de las tecnologías de comunicación más extendidas, ofreciendo alta velocidad de transmisión de datos con un consumo energético superior al de otras soluciones IoT de bajo consumo. Sus principales ventajas incluyen tasas de transferencia superiores a 100 Mbps en versiones recientes como WiFi 6, además de la disponibilidad de una infraestructura ya existente en la mayoría de los entornos urbanos e industriales.

Sin embargo, WiFi presenta un alto consumo energético, lo que lo hace menos viable para dispositivos IoT autónomos, además de tener un alcance más limitado en comparación con tecnologías como LoRa y otras soluciones LPWAN.

2.2.3. BLE (Bluetooth Low Energy)

BLE es una versión optimizada del Bluetooth clásico, diseñada para aplicaciones de bajo consumo en IoT. Opera en la banda de 2.4 GHz y es ampliamente utilizada en dispositivos 'wearables', domótica y sensores industriales. BLE se caracteriza por un consumo energético extremadamente bajo, lo que lo hace adecuado para dispositivos con baterías pequeñas. Además, es compatible con la mayoría de los dispositivos móviles modernos.

No obstante, BLE tiene un alcance limitado, de aproximadamente 100 metros en condiciones ideales, y su tasa de transferencia de datos es menor en comparación con WiFi, lo que restringe su uso en aplicaciones que requieren grandes volúmenes de datos.

2.2.4. Banda 868 MHz

La banda de 868 MHz es utilizada en Europa para diversas tecnologías de transmisión inalámbrica de baja potencia, como Sigfox y algunas implementaciones de LoRa. Esta banda ofrece un equilibrio entre consumo energético y alcance de comunicación, con mejor penetración de señal en comparación con frecuencias más altas como 2.4 GHz y un consumo energético reducido.

Entre sus desventajas, se encuentran regulaciones estrictas en algunos países y limitaciones en la tasa de transferencia de datos, lo que puede restringir su aplicabilidad en ciertos entornos.

2.3. Comparación de Tecnologías

A continuación, se presenta una comparación de las tecnologías analizadas:

Tecnología	Frecuencia	Consumo Energético	Alcance	Tasa de Datos
LoRa	868 MHz	Muy Bajo	Hasta 15 km	0.3 - 50 kbps
WiFi	2.4/5 GHz	Alto	Hasta 100 m	>100 Mbps
BLE	2.4 GHz	Muy Bajo	Hasta 100 m	1 Mbps
868 MHz	868 MHz	Bajo	Hasta 10 km	Variable

Tabla 1 Comparativa de Tecnologías

2.4. Conclusión

El desarrollo de nodos IoT de bajo consumo depende en gran medida de la elección adecuada de la tecnología de transmisión de datos. Mientras que WiFi y BLE son adecuados para aplicaciones de corto alcance y alto rendimiento, tecnologías como LoRa y la banda de 868 MHz ofrecen una mejor solución para redes de largo alcance con bajo consumo energético. La selección de la tecnología debe considerar factores como el entorno operativo, los requerimientos de autonomía y las restricciones de latencia.

Este análisis proporciona un marco de referencia para la implementación de soluciones IoT eficientes y optimizadas para diversas aplicaciones industriales y comerciales.

2.5. Impacto en la industria y la sociedad

El avance de las tecnologías de comunicación de bajo consumo ha revolucionado múltiples sectores, permitiendo la integración de dispositivos inteligentes en la industria y la sociedad. Tecnologías como LoRa, WiFi, BLE y la banda de 868 MHz han facilitado la automatización, el monitoreo en tiempo real y la optimización de recursos en ámbitos tan diversos como la manufactura, la salud, la agricultura y las ciudades inteligentes. Este documento analiza los principales impactos de estas tecnologías en la industria y en la sociedad, destacando sus beneficios y los desafíos que conllevan.

2.5.1. Impacto en la Industria

Las fábricas inteligentes han adoptado sensores IoT de bajo consumo para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos. La conectividad mediante LoRa y BLE permite el monitoreo continuo de máquinas y procesos, facilitando el mantenimiento predictivo y evitando fallos costosos. En el sector agrícola, el uso de redes IoT ha optimizado el consumo de agua, fertilizantes y energía mediante sistemas de monitoreo ambiental. Tecnologías como LoRa permiten la recopilación de datos desde sensores ubicados en grandes extensiones de terreno, mejorando la productividad y reduciendo el desperdicio de recursos. Asimismo, en logística y gestión de flotas, las tecnologías de comunicación de bajo consumo han revolucionado el rastreo de activos en tiempo real. BLE y la banda de 868 MHz permiten el seguimiento de productos y vehículos con un bajo impacto energético, mejorando la trazabilidad y reduciendo pérdidas en la cadena de suministro.

2.5.2. Impacto en la Sociedad

El despliegue de sensores IoT en las ciudades ha optimizado la gestión del tráfico, la recolección de residuos y el consumo energético en el alumbrado público. Tecnologías como LoRa y WiFi permiten la recopilación y transmisión de datos en tiempo real, favoreciendo la toma de decisiones basadas en información precisa. En el sector de la salud, el uso de dispositivos médicos conectados mediante BLE ha mejorado la monitorización de pacientes en tiempo real, permitiendo la detección temprana de problemas de salud y la mejora en la calidad de vida de personas con enfermedades crónicas. Sin embargo, estos avances también han generado desafíos en términos de ciberseguridad y privacidad. La creciente interconexión de dispositivos expone a la sociedad a riesgos de ataques cibernéticos y filtraciones de datos personales, lo que hace necesario el desarrollo de estándares de seguridad más robustos.

Como conclusión, las tecnologías IoT de bajo consumo han transformado la industria y la sociedad, permitiendo una mayor eficiencia en sectores clave como la manufactura, la agricultura y la salud. Sin embargo, también presentan desafíos que deben ser abordados para garantizar su implementación segura y sostenible. A medida que estas tecnologías continúan evolucionando, es fundamental equilibrar los beneficios de la conectividad c

3. Desarrollo del proyecto

En este apartado se va a exponer todo el desarrollo del proyecto, desde las fases de diseño hasta la obtención de una corta serie de prototipos que serán usados en las pruebas en condiciones industriales.

El sistema NODES está compuesto por dispositivos Hardware y por un Software que puede utilizarse para la monitorización de variables de proceso tanto en industria (líneas de producción y maquinaria) como en productos, edificios e infraestructuras.

La solución consta de dos partes: Nodos y el Gateway.

- Los nodos son dispositivos capaces de monitorizar datos que vengan de sensores analógicos o digitales, duplicar señales de máquina y al mismo tiempo conectarse a controladores mediante protocolos de industria estándares. Los nodos se comunican entre ellos a través de una red de baja potencia.
- El Gateway es el dispositivo encargado de recoger la información de los diferentes nodos, y transmitirla (subirla) a la plataforma Cloud, para su tratamiento, almacenamiento y presentación.

3.1 ESPECIFICACIONES DE LOS NODOS Y DEL GATEWAY.

3.1.1 NODO

El nodo se ha desarrollado de modo que sea capaz de comunicarse a través de un transceiver, siendo el transceiver un dispositivo que cuenta con los circuitos electrónicos capaces de procesar información que puede ser enviada o recibida por el mismo, transmitiendo en la banda de frecuencia 868 MHz. Además, el transceiver contiene la lógica para darle funcionalidad a la red, y va acompañado de una electrónica para poder acondicionar las señales que capturara. El Transceiver se podría sustituir por cualquier Transceiver que esté entre estas 5 tecnologías:

- Modem 4G.
- Transceiver Mesh 868Mhz.
- Transceiver Halow 868Mhz.
- Transceiver LoRa.

- Opción LoRAWAN.

La ventaja de estos dispositivos es que permiten crear redes de largo alcance y con la posibilidad de conectar miles de dispositivos. Estos dispositivos o nodos optimizan el consumo energético, aumentando directamente el ciclo de vida de las baterías, por lo que es una configuración ideal para aplicaciones IoT, aplicaciones M2M, tracking y automatización. Como se ha introducido anteriormente, los nodos forman una red mallada, esto permite crear y desplegar rápidamente sistemas de tele gestión escalables para la gestión remota, encendido/apagado de periféricos conectados a los nodos, regulación y monitorización individual de dispositivos, inclusión de datos de otros sensores específicos, etc.

Entre todos los nodos se crea una tipología de red mallada (Mesh). Esto quiere decir que los nodos de la red comunican entre ellos sin necesidad de pasar por el Gateway, permitiendo desplegar fácilmente redes en entornos complejos donde no exista visibilidad directa entre los nodos y el Gateway.

La red Mesh también es capaz de analizar el estado de cada nodo para decidir cómo deben conectarse entre ellos para tener la mejor cobertura. Entre los factores que tienen en cuenta está la distancia, la potencia de la señal de cada uno, la saturación de los nodos o la cantidad de dispositivos conectados a cada uno. Todo esto se hace automáticamente por parte de los nodos de la red para que el usuario no tenga que preocuparse.



Ilustración 3 Red mallada

La arquitectura utilizada es totalmente abierta y escalable. El sistema que forman los nodos junto con el Gateway puede funcionar tanto de forma autónoma como integrarse

con cualquier sistema o plataforma de gestión que disponga el cliente.

En lo que afecta al número de nodos que se pueden integrar en una misma red, se ha dimensionado para poder gestionar 1024 nodos por Gateway. Si se desean conectar más nodos, se generarían subredes de 1024 nodos, con un Gateway en cada subred. Esto dependerá del entorno en el que vayamos a desplegar la red y las características de la misma.

Respecto a la comunicación con los nodos, el Gateway (Master) recibe los comandos por web, a través de un módem 4G, o bien mediante un conector RJ45 o WIFI, si hubiese redes disponibles como pudiese ser el caso de ayuntamientos o plantas de producción con puntos de acceso. El Master o Gateway recibe las órdenes y comunica las mismas al resto de nodos, siendo la comunicación bidireccional. Respecto la seguridad, se implementa un modelo HW/SW de seguridad para conectividad. Tanto las comunicaciones entre nodos como la comunicación con el Cloud están cifradas, así como el acceso a nodos o Gateway de la arquitectura propuesta.

A continuación, se detallan las capacidades de los nodos en lo que respecta a entradas y salidas para monitorizar máquinas, procesos productos o conexión a sensores. El circuito de acondicionamiento electrónico y el firmware del nodo Mesh es capaz de gestionar una gran cantidad limitada E/S digitales y analógicas permitiendo conectar cualquier tipo de sensor previo acondicionamiento con la electrónica necesaria según requerimientos. Los nodos disponen de:

- 2 entradas analógicas 0...10v
- 4 entradas analógicas 4...20mA
- 4 entradas digitales 3.3 – 24 VDC
- 2 salidas digitales 3.3 – 24 VDC

Esto es viable gracias a una electrónica de acondicionamiento de señal embebida en el nodo y que se ha diseñado especialmente para cumplir las especificaciones de industria. En el proyecto NODES, se ha optimizado esta electrónica para minimizar el consumo energético y tratar de que los nodos sean autónomos energéticamente, dependiendo su funcionamiento de una batería 'on board'.

3.1.2 GATEWAY

El Gateway que se ha usado para el proyecto NODES, se basa en el kit de desarrollo de ST 'stm32mp157f-dk2'.

Con este Gateway se dispone de diversos módulos software que permiten cualquiera de estas funcionalidades:

- Conectarse con Google Cloud para enviar los datos a la nube, y, a través de ella a la plataforma IoT que se desee.
- Conectarse a una red Blockchain, enviar datos y recibir datos de la misma. (estamos en estudio de ver si puede actuar como nodo Blockchain o tendría que conectarse con otro nodo Blockchain externo).
- Funcionar como servidor OPC UA para que cualquier cliente que esté en la red pueda consultar las variables de proceso.
- Disponer de algoritmos de IA y de ML en el propio nodo, en caso de que fuese necesario por la arquitectura de red implementada.

Este Gateway puede comunicarse con otros elementos de la red, como por ejemplo un PLC con distintos protocolos: Modbus, OPCUA, etc....

A través del Gateway se puede realizar en caso necesario la actualización remota del software del mismo. El Gateway va conectado a un módulo de comunicaciones, que será el encargado de comunicar con toda la red de nodos.

Teóricamente, el Gateway permite comunicar un número ilimitado de nodos, pero como se ha comentado anteriormente, se recomendará un máximo de 1024 nodos por cada Gateway, aunque esto dependerá de las características de cada instalación (distancia entre nodos, volumen de datos...)

PRINCIPALES VENTAJAS DE ESTE SISTEMA:

- Instalación 'plug and play'. Como no requiere el montaje de cuadros eléctricos externos, el sistema se puede implantar con más facilidad, montándose incluso dentro del propio cuadro máquina.
- Al comunicar de forma inalámbrica, también nos evitamos instalar el cableado de red a lo largo de la planta/línea.

- Esta solución no depende de los stocks y plazos de entrega que está sufriendo el sector de la automatización actualmente a causa de la escasez de componentes.
- Los costes de implantación, tanto de Hardware como de mano de obra se reducen considerablemente.

3.2 Diseño del circuito electrónico

Para el diseño del circuito electrónico, se ha usado el programa KiCad, en su versión 8.0. KiCad es una suite de software de código abierto para la automatización de diseño electrónico (EDA, por sus siglas en inglés). Es utilizado para crear diagramas esquemáticos y diseños de circuitos impresos (PCB).

A continuación, se va a analizar el esquema electrónico por bloques, para explicar las principales características de cada bloque.

En primer lugar, tenemos la parte del microcontrolador encargado de gestionar las diferentes entradas y salidas del nodo. Se ha elegido un STM32L021G4. Se ha elegido este MCU por su bajo consumo y su capacidad para operar en modo 'Sleep'.

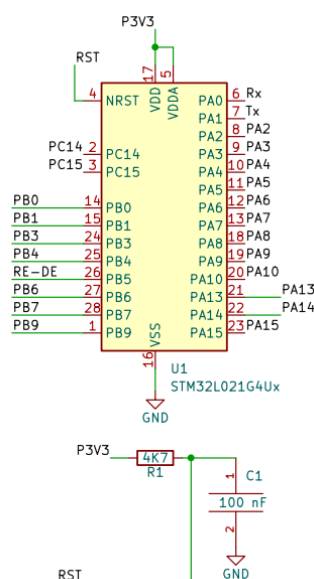


Ilustración 4 MCU

El STM32L021G4 es un microcontrolador de ultra bajo consumo perteneciente a la familia STM32L0 de STMicroelectronics, diseñado especialmente para aplicaciones que demandan alta eficiencia energética, como dispositivos IoT (que es de lo que consta NODES), wearables y sistemas alimentados por batería. Este microcontrolador está basado en un núcleo ARM Cortex-M0+ de 32 bits, capaz de operar a una frecuencia de reloj de hasta 32 MHz, lo que lo hace adecuado para tareas que requieren un equilibrio entre rendimiento y consumo energético. Además, su arquitectura de pipeline de 2 etapas está optimizada para ofrecer un alto rendimiento manteniendo un bajo consumo de energía.

Una de sus características más destacadas es su capacidad de operar en modos de bajo consumo, como el modo Sleep, con un consumo típico de 1.1 μA , el modo Stop, con 0.35 μA (manteniendo el RTC activo), y el modo Standby, que reduce aún más el consumo para maximizar la vida útil de la batería en aplicaciones críticas. Estas características lo convierten en una opción ideal para nuestro proyecto, ya que requerimos un microcontrolador compacto, eficiente y versátil.

El siguiente esquema, muestra la parte encargada del filtrado de la señal de entrada de programación para el microcontrolador.

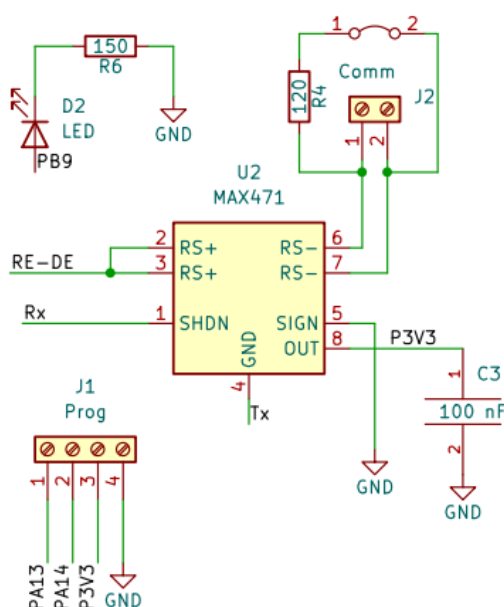


Ilustración 5 MAX 471

Para ello, hemos usado el chip MAX741, que es un filtro activo de tipo Butterworth con respuesta de paso bajo y pendiente de -20 dB por década, diseñado para aplicaciones de procesamiento de señal analógica. Cuando se conecta al STM32, el microcontrolador puede leer la señal filtrada desde su salida analógica mediante un ADC. La alimentación del MAX741 debe estar dentro de su rango especificado, y la señal analógica de entrada proviene de un sensor o una fuente de señal que necesita ser suavizada antes de su procesamiento digital. Su uso es común en aplicaciones de adquisición de datos, eliminación de ruido y acondicionamiento de señales en sistemas embebidos, y por ello lo hemos elegido para implementarlo en la PCB del proyecto NODES.

Seguidamente, observamos el circuito encargado de gestionar las entradas digitales.

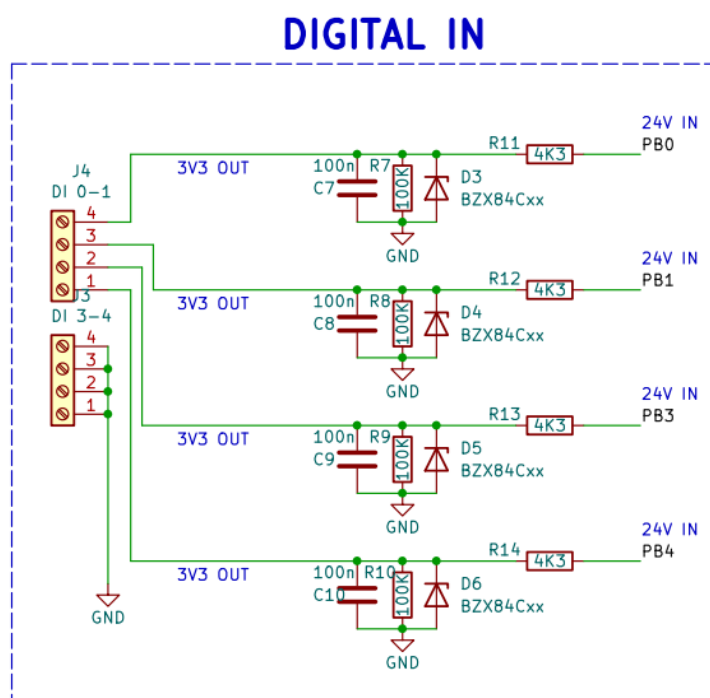


Ilustración 6 Esquema Digital IN

Este circuito es un acondicionador de señales para entradas digitales en un sistema que opera con niveles de 24V y 3.3V. Su diseño asegura que el consumo principal de corriente provenga de la fuente externa de 24V, minimizando el consumo del microcontrolador (MCU).

Descripción del funcionamiento:

Fuente externa y divisor resistivo:

- Las resistencias de 4.3 k Ω (R11-R14) limitan la corriente proveniente de la entrada de 24V, creando un divisor de tensión junto con las resistencias internas de 100 k Ω (R7-R10). Esto permite reducir la tensión a niveles seguros (3.3V) para el circuito del MCU.

Protección contra sobretensiones:

- Los diodos Zener (D3-D6) están configurados para limitar la tensión a 3.3V. Si la entrada supera este valor, los Zener entran en conducción y derivan el exceso de corriente hacia tierra, protegiendo el circuito.

Filtrado de ruidos:

- Los condensadores de desacoplo de 100 nF (C7-C10) filtran los transitorios y ruidos de alta frecuencia en las líneas de entrada, asegurando que las señales digitales procesadas sean estables y libres de interferencias.

Conexión con el MCU:

- La señal ajustada y filtrada se entrega a las entradas digitales del MCU a través de las líneas etiquetadas como "3V3 OUT". Gracias a las resistencias de 100 k Ω , el consumo de corriente en el nodo del MCU es mínimo, ya que la mayor parte del consumo proviene del circuito de 24V externo.

Se ha realizado este diseño para el proyecto NODES porque es eficiente y adecuado para aplicaciones industriales, ya que garantiza protección, acondicionamiento de señal y bajo consumo en el MCU, preservando su rendimiento.

El siguiente punto es diseñar la parte de la alimentación, utilizando convertidores DC-DC eficientes para minimizar consumos. A continuación, se muestra el esquema del circuito implementado.

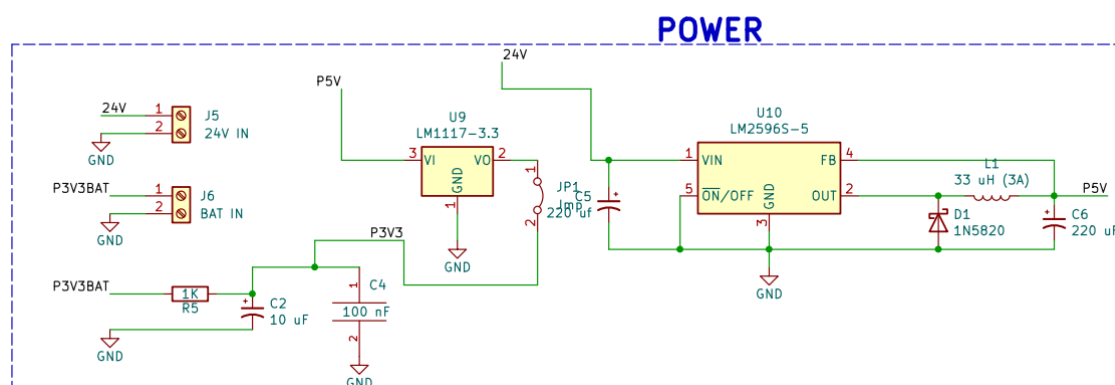


Ilustración 7 Circuito de alimentación

Esta etapa de alimentación está diseñada para convertir una entrada de 24V en dos salidas reguladas: 5V (P5V) y 3.3V (P3V3) para alimentar los distintos componentes de la PCB. A continuación, se describe su funcionamiento:

Entrada de 24V

- J5 (24V IN): Conector para la entrada principal de 24V, proveniente de una fuente de alimentación externa.
- J6 (BAT IN): Conector adicional que permite la alimentación desde una batería en caso de que la fuente principal no esté disponible, generando la señal P3V3BAT.

Regulación de 3.3V (lineal)

- LM1117-3.3 (U9): Es un regulador lineal de baja caída de tensión (LDO) que convierte los 24V de entrada a 3.3V. Este voltaje es estabilizado y utilizado como salida P3V3.
- Capacitores C2, C4, y JP15 (10 µF y 100 nF): Filtran ruidos y transitorios en la línea de entrada y salida para garantizar una señal estable y limpia.

Regulación de 5V (conmutada)

- LM2596S-5 (U10): Es un regulador de conmutación (step-down) que convierte los 24V de entrada a 5V con mayor eficiencia energética que un regulador lineal, especialmente útil para corrientes elevadas.

- Circuito externo del regulador conmutado:
 - L1 (33 μ H): Inductor que almacena y transfiere energía al circuito de salida, suavizando el voltaje y mejorando la eficiencia del regulador.
 - D1 (1N5820): Diodo Schottky que permite el flujo de corriente durante los ciclos de conmutación y reduce las pérdidas gracias a su bajo voltaje de caída directa.
 - C6 (220 μ F): Filtra el voltaje de salida de 5V para eliminar ruidos y estabilizar la señal.

Selección y redundancia

- R5 (1k): Forma un divisor de tensión o resistencia pull-down en la línea P3V3BAT para garantizar condiciones de operación específicas al seleccionar la fuente de alimentación secundaria.

Conexiones de salida

- P3V3 y P5V: Salidas de 3.3V y 5V que alimentan los diferentes módulos de la PCB. Estas tensiones son esenciales para los componentes digitales (MCU, sensores, etc.).

Este diseño combina regulación lineal, para simplicidad y bajo ruido en 3.3V y regulación conmutada, para mayor eficiencia en 5V, garantizando estabilidad y flexibilidad en el sistema.

Respecto a las salidas digitales, se ha optado por diseñar este circuito opto acoplado:

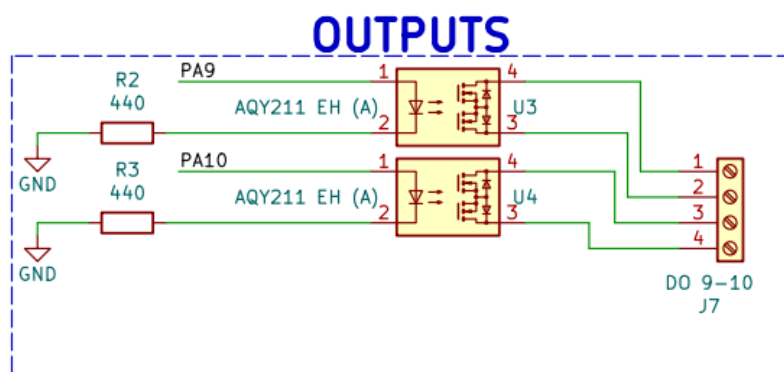


Ilustración 8 Circuito de salidas digitales

Este circuito de salidas digitales utiliza optorrelés (AQY211 EH) para proporcionar un control eficiente en términos de energía y aislamiento galvánico entre el microcontrolador (MCU) y las cargas externas.

Descripción del funcionamiento.

- Control por el MCU: Los pines PA9 y PA10 del microcontrolador generan señales digitales para controlar las salidas. Cada señal activa un optorrelé correspondiente (U3 y U4), permitiendo controlar cargas externas.
- Bajo consumo energético: Las entradas de los optorrelés utilizan LEDs infrarrojos internos que requieren una corriente mínima para activarse, limitando el consumo energético. La resistencia de 440 Ω (R2 y R3) regula esta corriente, protegiendo el LED del optorrelé y asegurando un consumo controlado. Comparado con relés mecánicos tradicionales, los optorrelés son significativamente más eficientes porque no necesitan corriente adicional para mantener una bobina activa.
- Aislamiento galvánico: El diseño de los optorrelés proporciona aislamiento eléctrico completo entre el lado de control (MCU) y el lado de carga externa. Esto protege al microcontrolador de ruidos, interferencias o sobrevoltajes provenientes de la carga.
- Conexión de la carga: Las salidas del optorrelé (pines 3 y 4) están conectadas al conector J7 (DO 9-10), que permite el control de las cargas externas. Los optorrelés pueden manejar señales de baja potencia con alta eficiencia, ideales para sistemas con restricciones energéticas.

- Alta eficiencia energética: Este circuito es extremadamente eficiente porque el consumo del LED interno de cada optorelé es muy bajo, no hay partes móviles como en los relés mecánicos, lo que reduce pérdidas y desgaste, y el aislamiento galvánico mejora la confiabilidad, reduciendo la necesidad de circuitos de protección adicionales.

En resumen, este diseño es ideal para aplicaciones que requieren un control digital de cargas con bajo consumo energético y alta confiabilidad, combinando eficiencia y robustez mediante el uso de optorelés. Este ha sido el motivo de seleccionar este tipo de circuitos para nuestra PCB.

Para terminar, explicaremos el módulo diseñado para entradas analógicas.

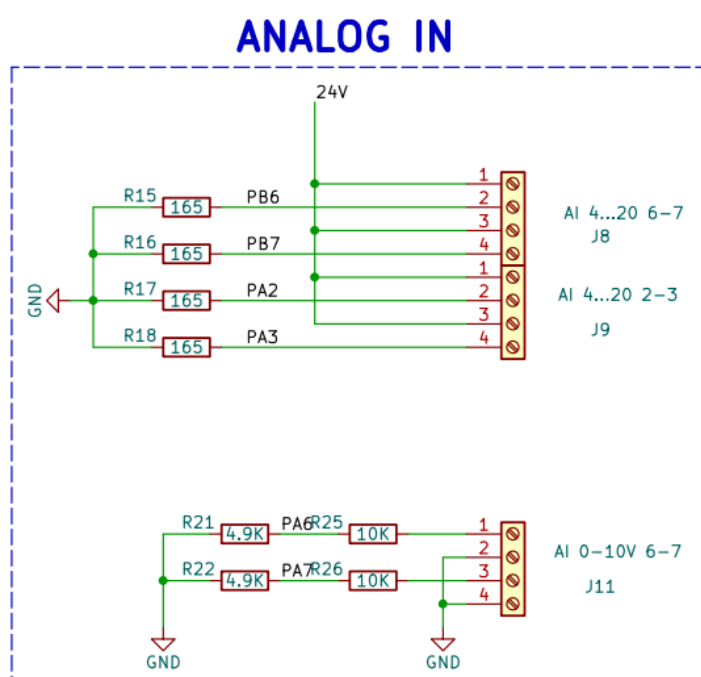


Ilustración 9 Módulo analógico

El diseño que se ha realizado conforma un módulo de entradas analógicas que puede manejar señales de 4-20 mA y 0-10 V. A continuación, se expone el funcionamiento del circuito en cuestión:

Entradas Analógicas:

- 4-20 mA: Este es un estándar común en la industria para transmitir señales

analógicas. La corriente varía entre 4 mA (mínimo) y 20 mA (máximo).

- 0-10 V: Otra señal analógica común, donde el voltaje varía entre 0 V (mínimo) y 10 V (máximo).

Componentes Utilizados:

- Resistencias (R15, R16, R17, R18, R21, R22): Las resistencias de 165 ohmios (R15, R16, R17, R18) se usan para convertir la corriente en voltaje (ley de Ohm: $V = I * R$). Por ejemplo, para una señal de 4-20 mA, una resistencia de 165 ohmios convertiría la corriente en un voltaje de 0.66 V a 3.3 V. La resistencia de 4.9K (R21) forma parte de un divisor de voltaje mientras que R22 está conectada a tierra (GND) para cerrar el circuito.

Los Pines PA2, PA3, PB6 y PB7 están conectados al ADC (Convertidor Analógico-Digital) del microcontrolador para leer las señales convertidas.

- Conectores (J8, J9, J11): J8 y J9 están asociados con las entradas de 4-20 mA, mientras que J11 está asociado con la entrada de 0-10 V.

Funcionamiento:

- Para 4-20 mA: La corriente pasa a través de las resistencias convirtiendo la corriente en un voltaje proporcional. Este voltaje se mide en los pines correspondientes (PA2, PA3, etc.) y se convierte en un valor digital mediante un ADC.
- Para 0-10 V: El voltaje se aplica directamente al circuito a través de J11. El divisor de voltaje asegura que el voltaje esté dentro del rango aceptable para el ADC (máx. 3.3 V).

Este diseño es altamente eficiente en términos de consumo energético para el microcontrolador, ya que la mayor parte del consumo de energía asociado con la medición de las señales analógicas es absorbido por la fuente externa que genera las señales de 4-20 mA o 0-10 V. En lugar de requerir que el microcontrolador genere o maneje corrientes o voltajes elevados, el circuito se limita a convertir y acondicionar las señales entrantes, lo que reduce significativamente la carga de trabajo y el consumo de energía del microcontrolador. Esto es especialmente beneficioso en aplicaciones donde el bajo consumo es crítico, como es nuestro caso, ya que NODES se basa en dispositivos alimentados por batería. Al delegar el esfuerzo energético a la fuente externa, el microcontrolador puede operar de manera más eficiente, enfocándose únicamente en

procesar las señales ya convertidas, lo que contribuye a un diseño general más optimizado y sostenible.

Con este punto estaría completo el diseño y se podría proceder al ruteo de las pistas, selección de huellas de componentes y generación de archivos GERBER para la fabricación del prototipo.

3.3 Diseño de la PCB

Para el diseño del 'layout', se ha primado el conseguir una PCB compacta, utilizando un diseño de 2 capas y con componentes en el TOP y el BOTTOM.

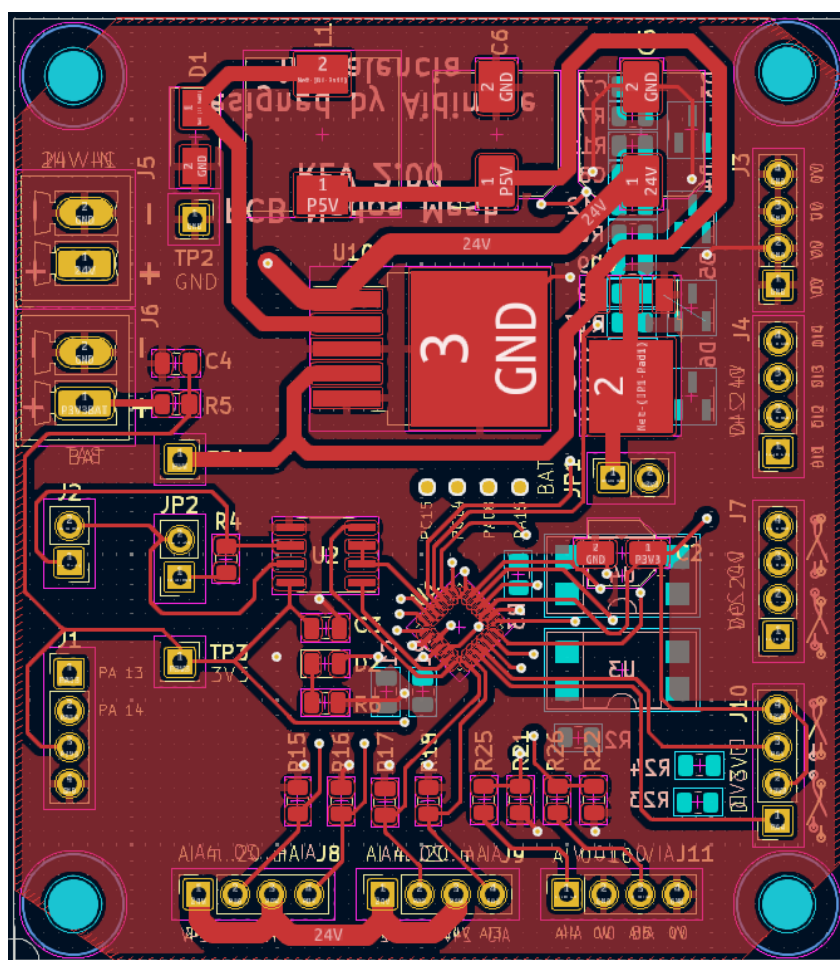


Ilustración 10 Layout

Se han dispuesto dos conectores con paso 3.5 mm para la alimentación, y el resto de los

conectores se han planteado con un paso de 2.5 mm para minimizar el espacio.

Una vez finalizado el 'layout' se ha generado un modelo 3D para verificar que los componentes están bien posicionados y que no hay colisiones.

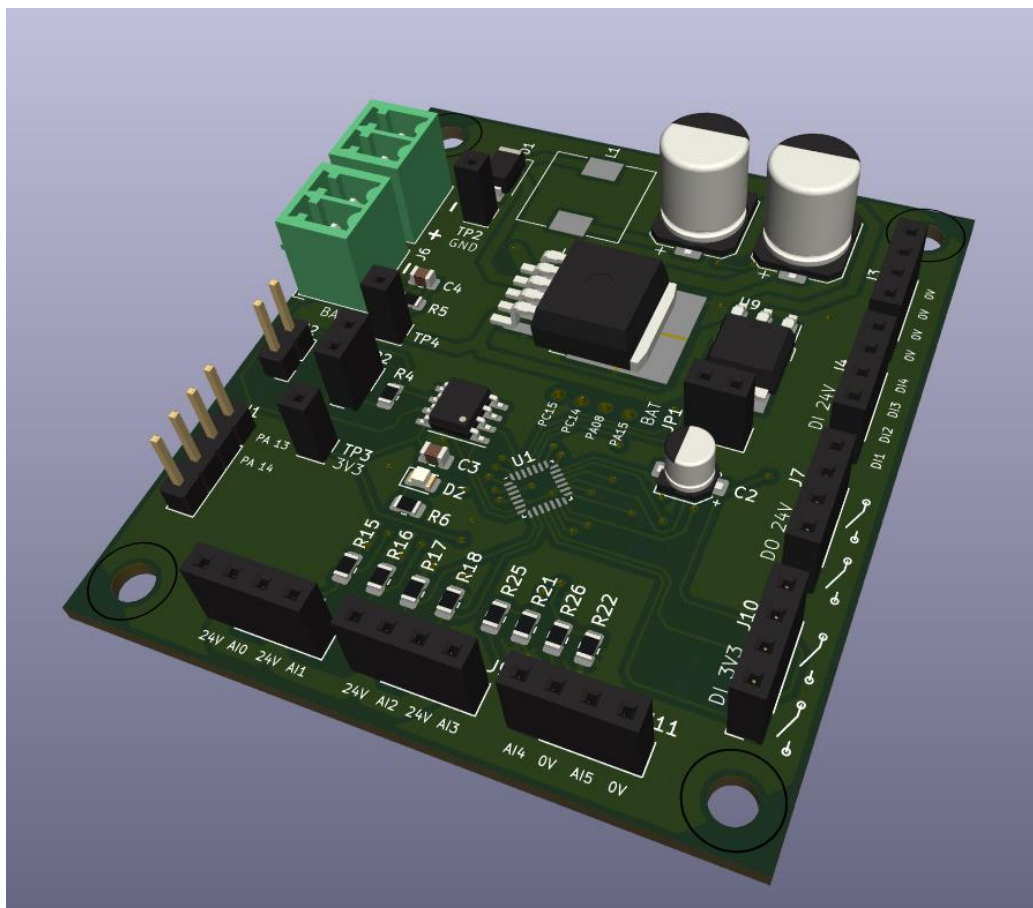


Ilustración 11 TOP 3D

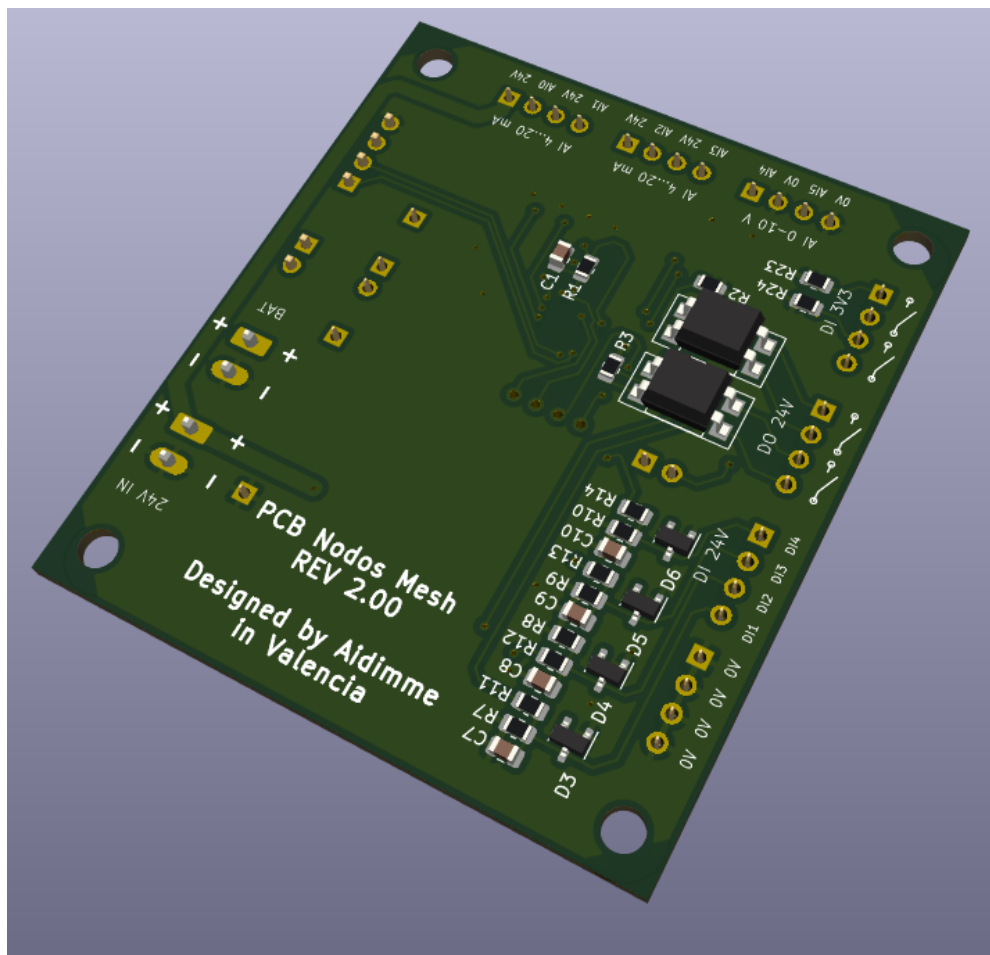


Ilustración 12 PCB BOTTOM 3D

Seguidamente, mostramos el Bill Of Materials (BOM) de nuestra PCB.

Id	Designator	Package	Quant.	Design.
1	R14,R13,R12,R11	R_0805_2012Metric	4	4K3
2	R10,R9,R8,R7	R_0805_2012Metric	4	100K
3	D6,D5,D4,D3	SOT-23	4	BZX84Cxx
4	C10,C9,C8,C7	C_0805_2012Metric	4	100n
5	H1,H4,H2,H3	MountingHole_3.5mm	4	Mounting
6	C4,C3,C1	C_0805_2012Metric	3	100 nF
7	R17,R16,R18,R15	R_0805_2012Metric	4	165
8	R25,R26,R24,R23	R_0805_2012Metric	4	10K
9	L1	L_10.4x10.4_H4.8	1	33 uH (3A)

10	R5	R_0805_2012Metric	1	1K
11	J2	PinHeader_1x02_P2.54mm_Vertical	1	Comm
12	TP3,TP4,TP2	PinSocket_1x01_P2.54mm_Vertical	3	TestPoint
13	R22,R21	R_0805_2012Metric	2	4.9K
14	J5	PhoenixContact_MCV_1,5_	1	24V IN
15	U1	QFN-28_4x4mm_P0.5mm	1	STM32L02
16	J3	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	DI 3-4
17	U10	TO-263-5_TabPin3	1	LM2596S-5
18	C6	CP_Elec_8x10	1	220 uF
19	J1	PinHeader_1x04_P2.54mm_Vertical	1	Prog
20	J11	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	AI 0-10V
21	J4	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	DI 0-1
22	C2	CP_Elec_4x4.5	1	10 uF
23	JP2,JP1	PinSocket_1x02_P2.54mm_Vertical	2	Jmp
24	J6	PhoenixContact_MCV_	1	BAT IN
25	J7	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	DO 9-10
26	J10	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	DI 3V3
27	J8	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	AI 4...20 6-7
28	D2	LED_0805_2012Metric	1	LED
29	U9	TO-252-3_TabPin2	1	LM1117-3.3
30	R6	R_0805_2012Metric	1	150
31	J9	PinSocket_1x04_P2.54mm_Vertical	1	AI 4...20 2-3
32	D1	D_SMA	1	1N5820
33	C5	CP_Elec_8x10	1	220 uf
34	U2	SOIC-8_3.9x4.9mm_P1.27mm	1	MAX471
35	R4	R_0805_2012Metric	1	120
36	U4,U3	DIP-4_W7.62mm_SMDSocket_SmallPads	2	AQY211 EH
37	R3,R2	R_0805_2012Metric	2	440
38	R1	R_0805_2012Metric	1	4K7

Tabla 2 Bill of Materials

3.4 Fabricación de prototipos

Una vez tenemos el diseño validado y las correspondientes simulaciones realizadas correctamente, generaremos los siguientes archivos de fabricación (GERBER) para poder proceder con el montaje de los prototipos. Los archivos GERBER se utilizan para la fabricación de circuitos impresos (PCBs) y contienen la información gráfica necesaria para que las máquinas de producción puedan crear las distintas capas del PCB. Cada

archivo Gerber corresponde a una capa específica del diseño, como las pistas de cobre, máscara de soldadura, serigrafía o incluso los agujeros mecanizados. Estos archivos, generados por el software de diseño KiCAD, definiendo con precisión las geometrías, dimensiones y posiciones de los elementos del circuito, asegurando que el PCB se fabrique exactamente como se diseñó. Estas serían las capas que vamos a exportar para generar los archivos GERBER en la PCB para el proyecto NODES.

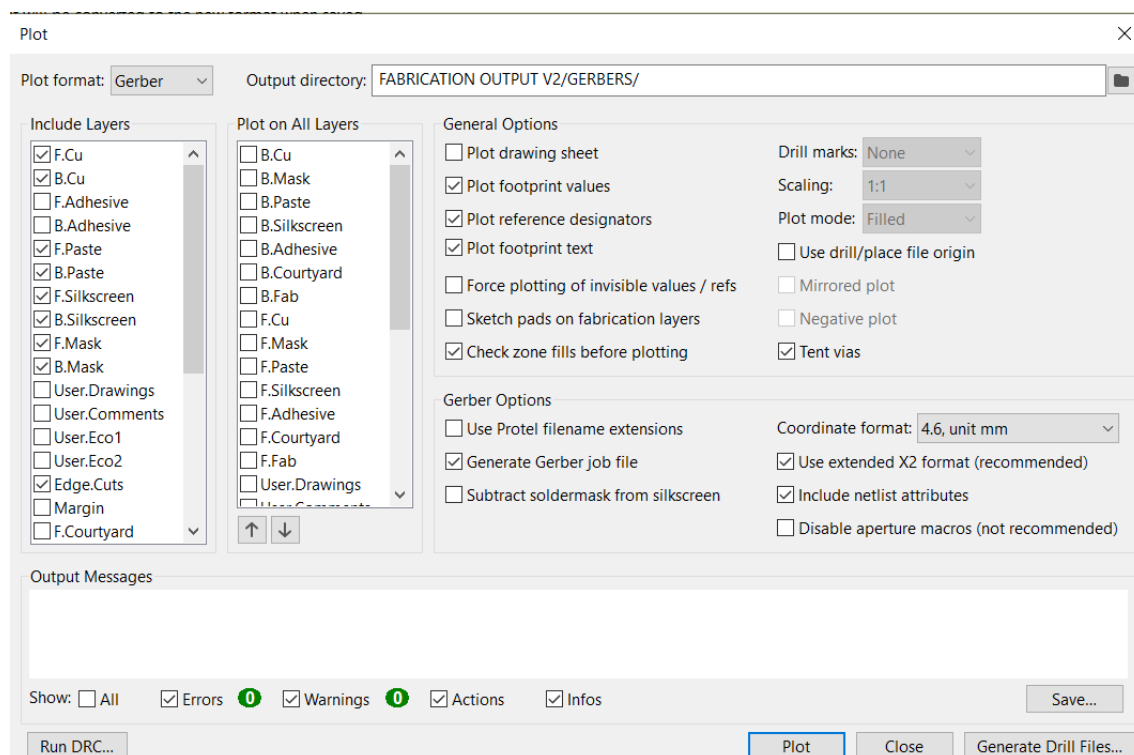
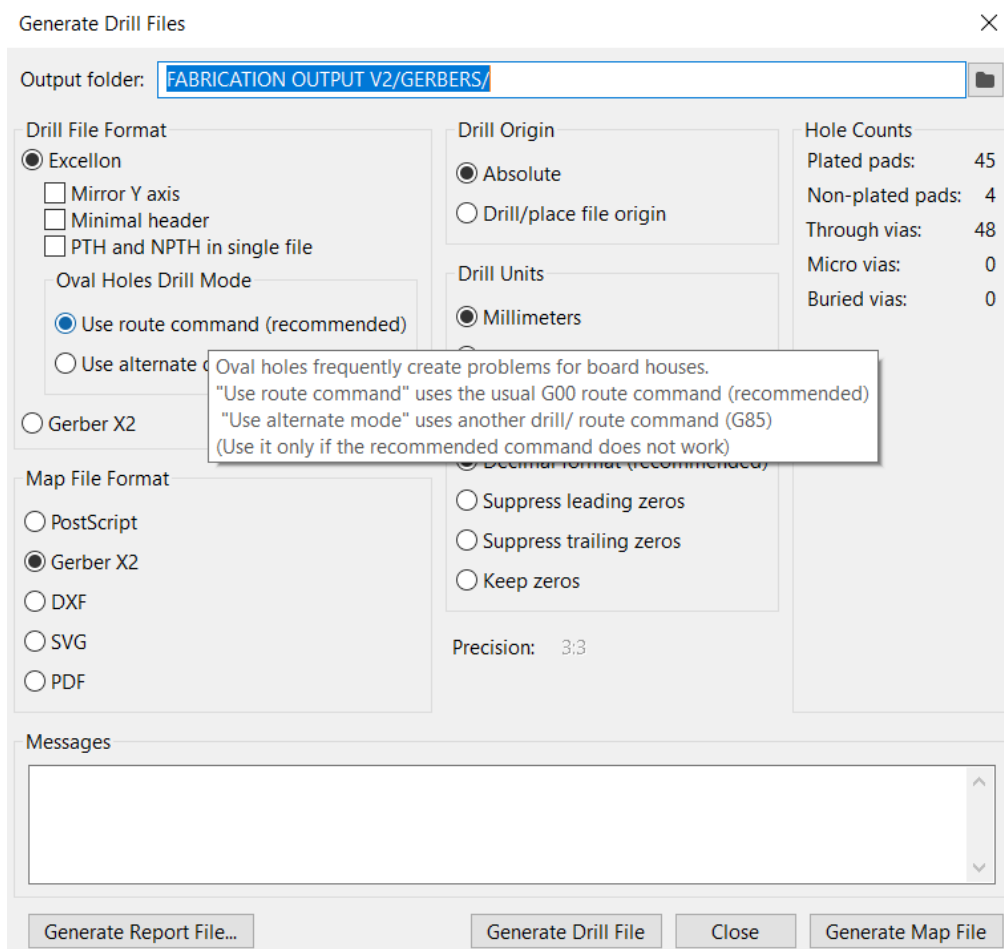


Ilustración 13 GERBER

Seguidamente, exportaremos los archivos de taladros para el CNC y los archivos de posición de componentes para adjuntarlo a los archivos de fabricación que se insertarán en el Pick and Place.



Il·lustració 14 Drill files.

Este sería el aspecto de los archivos GERBER una vez importados en un visor:

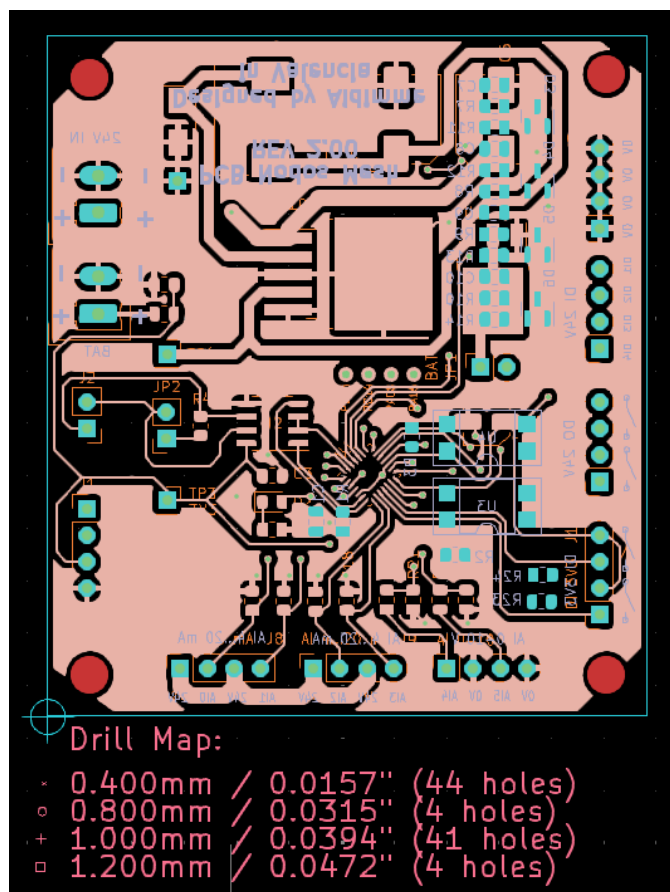


Ilustración 15 Visor GERBER

Una vez hayamos recopilado toda la documentación, se procederá a la fabricación de las PCB. Para eso se subcontratará dicha fabricación y montaje de componentes a la empresa PCBWAY, obteniendo los siguientes prototipos listos para funcionar:

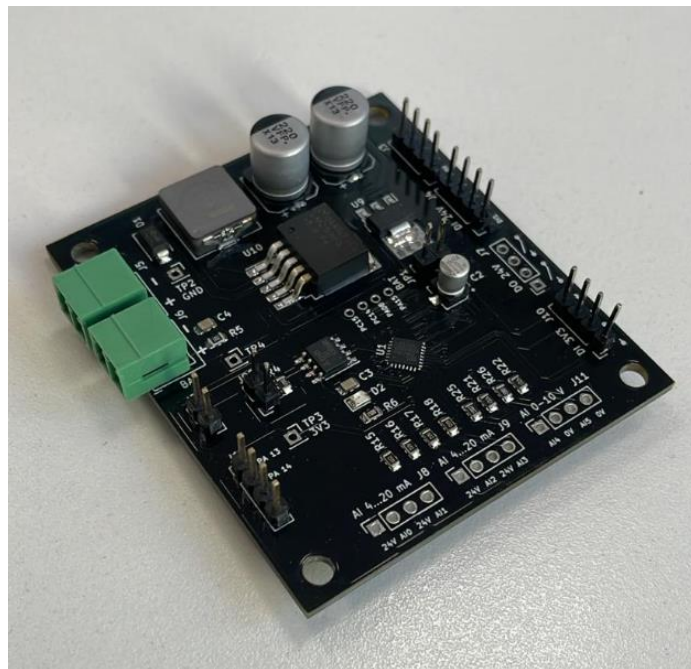


Ilustración 16 TOP del prototipo

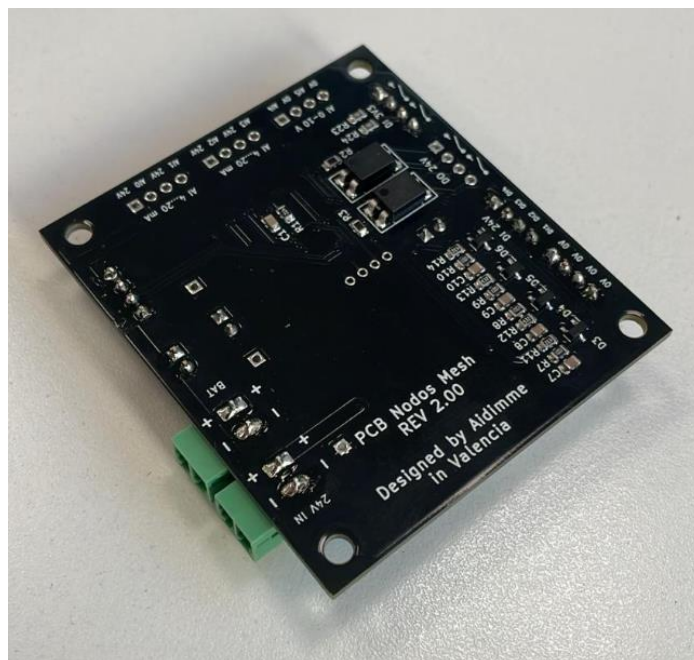


Ilustración 17 Bottom del prototipo

4. Pruebas en entorno industrial

Con el objetivo de demostrar la funcionalidad y eficiencia del sistema NODES en un entorno industrial simulado, se llevaron a cabo una serie de pruebas prácticas. Estas pruebas se diseñaron para validar el correcto funcionamiento de los nodos, las comunicaciones inalámbricas y el consumo energético, asegurando que el sistema cumple con los requisitos de bajo consumo y fiabilidad en un escenario industrial.

4.1. Configuración de las Pruebas

Para las pruebas iniciales, se utilizaron dos nodos conectados a baterías de iones de litio, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema en condiciones de alimentación autónoma. Como entradas digitales, se conectaron dos pulsadores a los nodos, simulando señales de activación típicas en un entorno industrial. La comunicación inalámbrica se realizó mediante la tecnología LoRa, conocida por su largo alcance y bajo consumo, lo que la hace ideal para aplicaciones IoT en entornos industriales. Como Gateway, se empleó la placa de evaluación STM32MP157F-DK2 de STMicroelectronics, que actuó como punto central de recepción y procesamiento de los datos enviados por los nodos.

4.2. Simulación del Entorno Industrial

Una vez verificada la funcionalidad básica del sistema, se procedió a simular un entorno industrial más complejo utilizando un PLC Siemens S7-1200. Este PLC se configuró para activar las entradas digitales de los nodos mediante sus salidas digitales, simulando así las señales que podrían generarse en una planta industrial. El PLC cuenta con contadores internos que registran el número de activaciones de sus salidas, lo que permitió comparar estos valores con los contadores de los nodos para validar la precisión y fiabilidad del sistema.

4.3. Resultados y Ajustes

Tras realizar los ajustes necesarios en la configuración de los nodos y el Gateway, se comprobó que el sistema funcionaba de manera correcta y consistente. Las comunicaciones LoRa demostraron ser robustas y confiables, incluso en un entorno simulado con posibles interferencias. Además, se midió el consumo energético de las PCB (placas de circuito impreso) de los nodos, logrando una reducción de hasta un 80% en el consumo de corriente en comparación con diseños anteriores que no incorporaban componentes LOW POWER. Este resultado es especialmente relevante para

aplicaciones industriales donde la eficiencia energética es un factor crítico.

4.4. Conclusión de las Pruebas

Las pruebas realizadas confirmaron la viabilidad del sistema NODES en un entorno industrial simulado. No solo se validó el correcto funcionamiento de las comunicaciones y la precisión en la captura de datos, sino que también se demostró la eficiencia energética del diseño, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de larga duración y bajo consumo. Estos resultados respaldan la escalabilidad y adaptabilidad del sistema para su implementación en entornos industriales reales, donde la fiabilidad y el bajo consumo son requisitos fundamentales.

5. Conclusiones y trabajo futuro

El sistema NODES representa una solución altamente eficiente y escalable para la monitorización y gestión de variables de procesos industriales, infraestructura y edificios. Uno de los aspectos clave de su diseño es la optimización energética de los nodos, que prolonga la vida útil de las baterías integradas y reduce la necesidad de mantenimiento frecuente. Tras el desarrollo del proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. **Reducción de Consumo Energético:** Los nodos emplean 'transceivers' de baja potencia y lógica optimizada para comunicaciones inalámbricas en redes malladas (Mesh), lo que minimiza el consumo energético. Este enfoque permite desplegar sistemas autónomos con nodos que pueden operar durante largos periodos sin recarga, una ventaja significativa para aplicaciones IoT en entornos donde no es viable la alimentación eléctrica continua.
2. **Diseño Inteligente de la Red:** La topología Mesh permite a los nodos comunicarse directamente entre sí, optimizando las rutas de transmisión según factores como distancia y potencia de señal. Esto no solo mejora la cobertura en entornos complejos, sino que también evita la sobrecarga de los nodos y minimiza el gasto energético durante la transmisión de datos.
3. **Eficiencia en Electrónica y Comunicaciones:** La electrónica de acondicionamiento de señal embebida en los nodos permite la integración de múltiples tipos de sensores (4-20 mA, 0-10 V, PWM, digitales) con un consumo energético muy bajo, cumpliendo los estándares industriales. Además, la comunicación cifrada con el Gateway garantiza la seguridad sin comprometer la eficiencia.
4. **Escalabilidad y Flexibilidad:** Con capacidad para gestionar hasta 1024 nodos por Gateway, este sistema es altamente escalable y puede adaptarse a diferentes entornos mediante la segmentación en subredes. Además, la interoperabilidad con protocolos estándar (Modbus, OPC UA, etc.) y la posibilidad de integración con plataformas IoT o Blockchain hacen del sistema una solución versátil para diversas aplicaciones.
5. **Reducción de Costes y Facilidad de Implementación:** La comunicación inalámbrica y el diseño "plug and play" eliminan la necesidad de instalar cableado y cuadros eléctricos externos, reduciendo significativamente los costes de instalación y los tiempos de despliegue. Este enfoque también evita problemas relacionados con la escasez de componentes en el sector.

En resumen, el proyecto NODES destaca por su enfoque en la eficiencia energética, escalabilidad, y reducción de costes, ofreciendo una solución moderna y sostenible para la automatización y monitorización en diferentes sectores. Este diseño no solo mejora la productividad y el mantenimiento, sino que también responde a las crecientes demandas de sostenibilidad y eficiencia en la industria.

AIDIMME

INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es

www.aidimme.es